

# 旋盤による超音波バニシング加工について

豊 島 敏 雄<sup>\*</sup>・古 村 義 彰<sup>\*</sup>・玉 村 弘 一<sup>\*\*</sup>

## Ultrasonic Burnishing By A Lathe & Carbide Tools

Toshio TESHIMA, Yoshiaki KOMURA & Kōichi TAMAMURA

(Received Oct. 15, 1969)

Burnishing is work shop method, using a blunt smooth tool, for smoothing and polishing a rough surface by pressure and not by removing any part of the body. In the previous paper we reported the burnishing which was one of the most expeditious methods of polishing.

But the burnishing by a lathe is not always easy for the friction and work hardening characteristics. The authors tried to give to the burnishing tool the ultrasonic vibration, protecting the seizure and promoting the work deformation, and we named this working process the ULTRASONIC BURNISHING.

The conditions for the ultrasonic burnishing process are not severer than those for the general burnishing process, and the mirror finish can be obtained easily for poor resistance materials to seizure as the stainless steel. But we should select the suitable conditions, to avoid the cross vibration of tool.

### 1 緒 言

バニシング加工法とは丸みを持った工具を工作物表面に押付けてこすり、切りくずを出さずに塑性的に表面をなめらかに仕上げる加工法である。筆者らは「旋盤によるバニシング加工について」(以下前報と呼ぶ)で次のような結論を得た。

- (1) 容易に形状係数の大きい鏡面が得られる。
- (2) 加工面は加工硬化を受けており残留圧縮応力を有し、回転曲げ疲労強さを向上させる。
- (3) 旋盤を用いるバニシング加工は、旋盤作業の最終工程として簡単に行なえるので非常に能率のよい加工法である。

このように旋盤によるバニシング加工は多くの特長をもっているが、工作物材料の摩擦特性や加工硬化性などによってはバニシング加工が困難な場合がある。筆者らはこれらの解決法としてバニシング工具に超音波振動を与えることにより、接触摩擦を断続的にして

焼付を防止し加工変形を促進させられるのではないかと考えた。本論文ではこのような方法を超音波バニシング加工と名づけ、その加工機構、加工条件と仕上面との関係、各種工作物材料の被加工性などについて報告する。

### 2 実験装置および方法

図1は実験装置の写真である。本実験で使用した超音波発振器①は最大出力500W、発振周波数21.6KHz±10%可変のもので、超音波振動子、ホーンおよび工具②は旋盤の送り台上の工作物に対してバイト台と反対側に取付けられた支柱③に、水平面内に回転できるように取付けてある。バニシング加工の押付け力はひずみゲージを貼った板ばね④で与える。振動子の振幅を増幅するコーンおよびホーンを使用したため、工具の押付け力に直角な方向の支持剛性が低く、摩擦力方向の力は支持ボルト⑤を用いて保持したが、送り方向の剛性不足は実験装置の機構上解決できなかった。そ

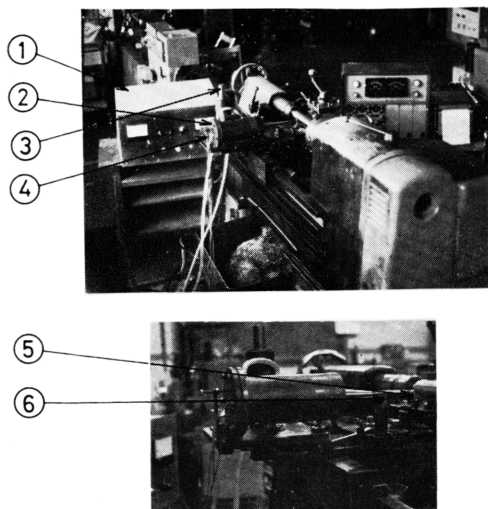


図1 実験装置

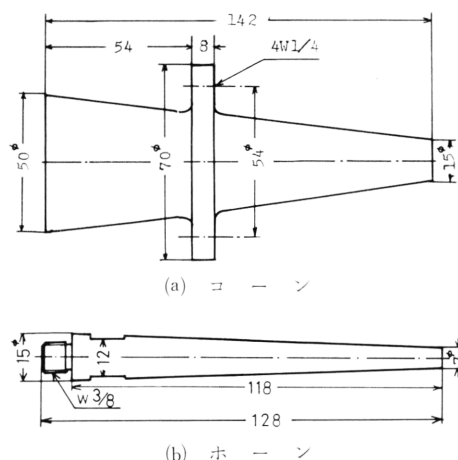


図2 コーンおよびホーンの寸法

れでホーンの横方向の振動を検出するためピックアップ⑥を取付けた。

また振動増幅用のコーンおよびホーンは本研究用に図2のような寸法形状のものを設計製作して使用した。前加工の旋削用工具、超音波パニング工具（以下工具とはこれを示す）は共に超硬合金チップP20を使用した。旋削用工具の形状は $0^\circ-6^\circ-6^\circ-6^\circ-15^\circ-15^\circ-0^\circ$ でチップブレイク幅は $0.8\sim 1.2\text{mm}$ 、深さは $0.2\sim 0.4\text{mm}$ の平行形である。一般にパニング工具としては硬度が大で耐摩耗性のよいもので、しかも工作物との親和力の小さいものがよい。ダイヤモンドはそのような条件を満足し適当であるが、本実験では超音波衝撃を与える特殊なパニング加工であり、入手加工の容易なP20を先端丸み半径 $3.8\text{mm}$ 、 $5.0\text{mm}$ 、 $33.3\text{mm}$

の円柱面とし後端をホーンに銀ろう付けした。

工作物として炭素鋼S25C、S35C、S45C、S55C、ステンレス鋼SU S27、銅、七三黄銅、アルミニウムおよび鋳鉄（約4% C）の各50 $\phi$ 丸棒を使用した。いずれも素材のまま使用したが、とくに加工硬化の程度を調べるために炭素鋼S25C、S35Cは $870^\circ\text{C}$ 、S45C、S55Cは $830^\circ\text{C}$ で1時間の真空焼鈍を行なった。

工作油は工作物と工具間の摩擦を低下させ、工具を冷却するために使用するもので、本研究ではスピンドル油#60、スピンドル油#60+10%オレイン酸、メカニック57（マシン油）、メカニック57+10%オレイン酸、サラダ油およびモビール油GX140を使用した。

実験はまず工作物を所定の条件で旋削し、つぎに超音波パニング加工機の発振器出力を所定の値に調節し、工具を所定の押付け力で押付けて超音波パニング加工を行なう。パニング加工された工作物の表面あらさは触針式万能仕上面検査機で、硬度はビッカース微小かたさ試験機で測定し、表面の顕微鏡観察をする。

### 3 パニングによる変形

パニング加工における接触変形の理論は前報で詳述したので省略する。

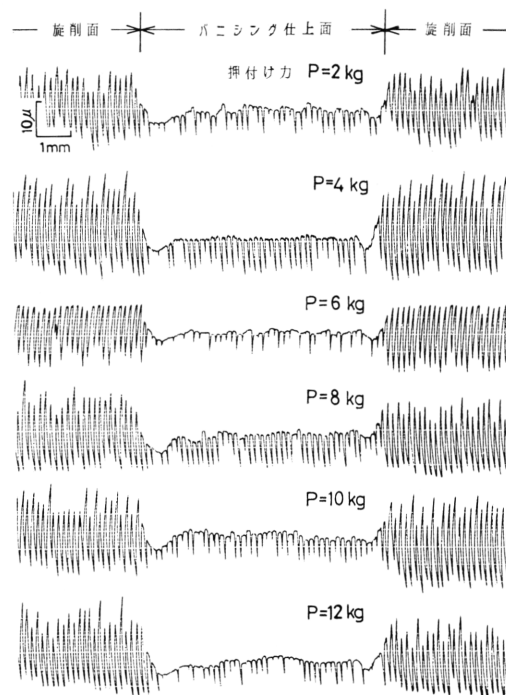


図3 仕上面あらさ

図3は旋削面と超音波パニシング加工面のあらさ曲線である。図からわかるように旋削面とパニシング加工面のあらさの中心線はほぼ一致している。このことからパニシング加工は前加工面のあらさの山を押さえ、谷を浮き上がらせて平滑面を作り出す塑性加工の一種であることがわかる。また加工圧力はばね力で与えられるので、前加工面にうねりがある場合には、パニシング加工してもそのままうねりが残り、うねりにそった小さいピッチの凹凸のみがならされることになる。

工具と加工面の接触部分は20kg程度の静的押付け力では完全には塑性変形しないが、超音波振動衝撃力と摩擦によるせん断力のためかなりよく加工されてならされる。また押付け力が15kg以上では油膜が切れてスティックスリップを起こし加工面があらえてくることがあった。そのため本実験では押付け力を20kg以下で行なった。

#### 4 実験結果および考察

##### 4・1 加工条件と仕上面あらさ

本研究は主として鏡面加工に関するものであるが、仕上面あらさは加工条件によって大きく変わる。4・1では炭素鋼を用いた場合の種々のパニシング加工条件と中心線平均あらさ（以下仕上面あらさと呼ぶ）の関係を明らかにする。

##### 4・1・1 前加工の影響

前加工面のあらさが小さいほど、その後のパニシ

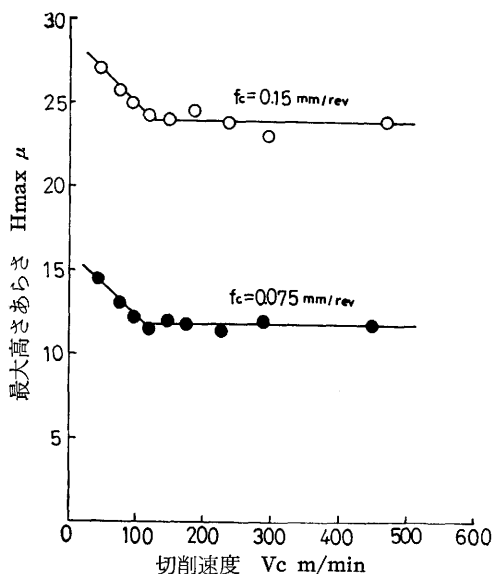


図4 最大高さあらさ

グによる鏡面仕上は容易であろう。図4は旋削面の最大高さあらさと切削速度の関係を示す。切削速度が高くなるにしたがってあらさは小さくなるが、切削速度が100m/min以上になると一定になる。これはバイト刃先形状から幾何学的に求められる理論最大高さあらさと比較して、構成刃先のない場合の実験値はその0.6倍と小さくなっている。これは工具刃先の摩耗によるものであろう。図5(a), (b)は前加工面あらさが異なる場合の押付け力とパニシング加工面あらさの関係である。図中のパラメータの分数は送り比（分子は旋削送りmm/rev, 分母はパニシング送りmm/revを表わす）を示している。いずれも前加工面あらさが小さいほど容易に（ゆるいパニシング条件で）よい仕上面が得られること、前加工面あらさが大きい場合にはパニシングによってもきれいな鏡面は得がたいことなどがわかる。また前加工面あらさが小さい場合、押付け力を必要以上に大きくしても仕上面あらさは良くならず、ときには面があらえてくることもある。

##### 4・1・2 工作油の影響

パニシング加工では工具と工作物のスティックスリップや焼付きが発生するとききれいな鏡面が得られない。潤滑油としては安定性のよい鉱物油が一般に多く用いられるが、摩擦条件の厳しい場合には油性添加剤、極圧添加剤などを加えて用いる。本研究では表1に示すような油を実験に使用した。ただし、摩擦係数および油膜強さは四球式摩擦試験機による測定値である。

表1 油の特性

工 作 油	摩擦係数	油膜強さ	粘 度 (20°C)
メカニク 57	0.10	320kg/mm <sup>2</sup>	107 cst
メカニク 57+ 10%オレイン酸	0.08	380kg/mm <sup>2</sup>	90 cst
スピンドル油 #60	—	250kg/mm <sup>2</sup>	12 cst
サラダ油	0.10	250kg/mm <sup>2</sup>	73 cst
モビール油 G X 140	0.09	510kg/mm <sup>2</sup>	—

図6(a), (b)は工作油をパラメータにした押付け力とあらさの関係を示す。図からモビール油を使用した場合が仕上面は最も悪く、その他の工作油ではあまり差がみられない。スピンドル油を使用した場合が比較的よい。それは粘度が小さく加工中に工具と工作物間に入りやすく、工作物の回転により摩擦粉がスピンドル油とともにとび散り、摩擦部の清浄作用と冷却作用がよいことなどによるものと思われる。一般のパニシ

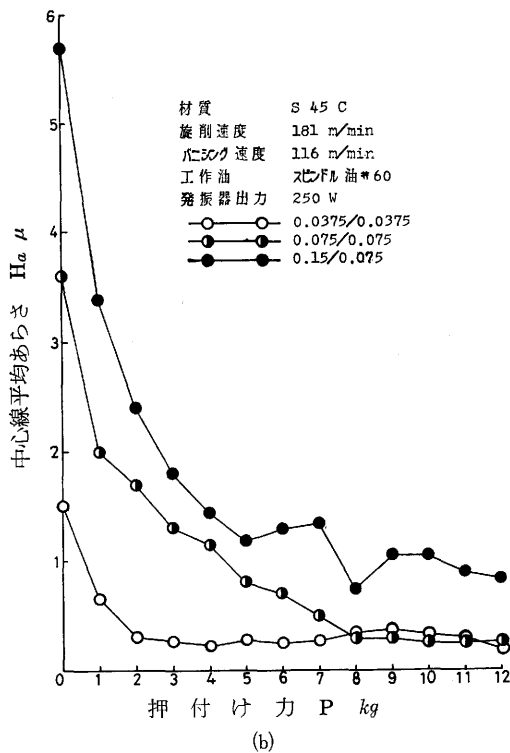
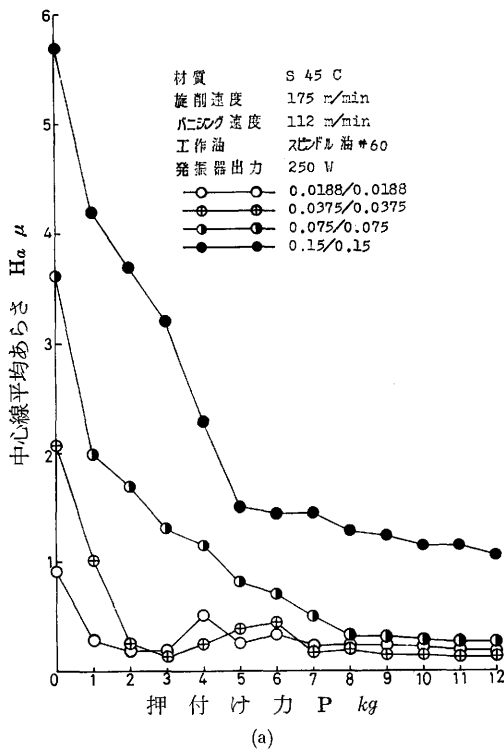


図5 前加工面のあらさ

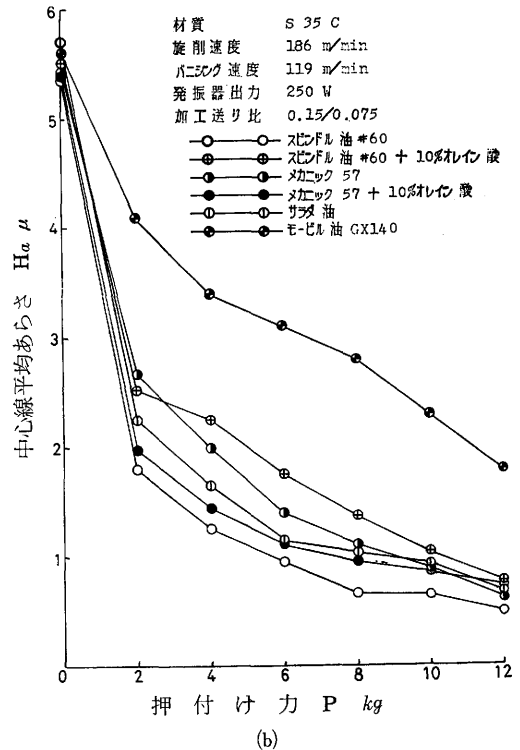
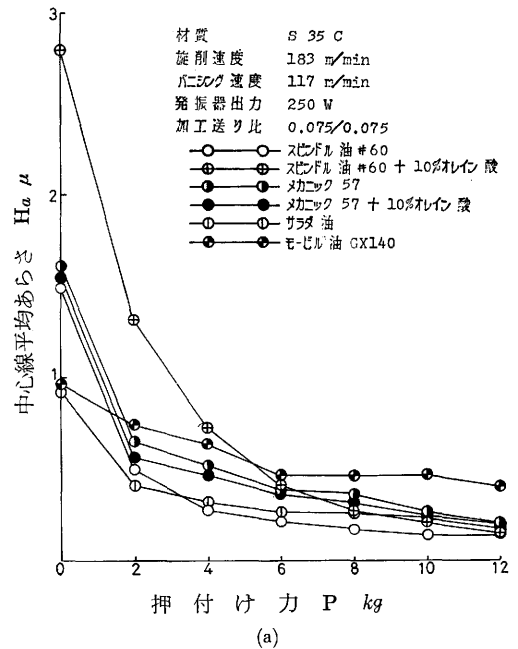


図6 工作油の影響

グ加工ではすでに前報で述べたように粘度がある程度高く油膜強さの大きい油を使用すべきであるが、超音波パニングの場合にはとくに摩擦条件のきびしいとき以外は粘度の小さい工作油がよいことになる。超音波パニングの場合には工具と工作物が超音波振動接触を行なうので焼付きを起こしにくく、そのような条件の相違が工作油の適性に影響するのであろう。

#### 4・1・3 加工速度の影響

加工速度を高くしても加工面があらえないならば能率の点から加工速度を高くしたい。図7(a)、(b)はパニ

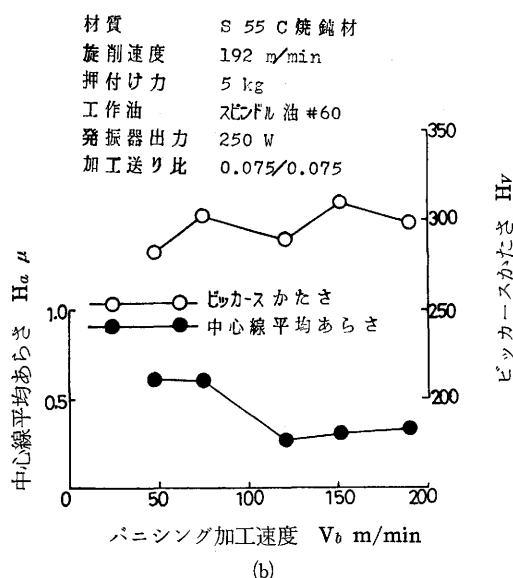
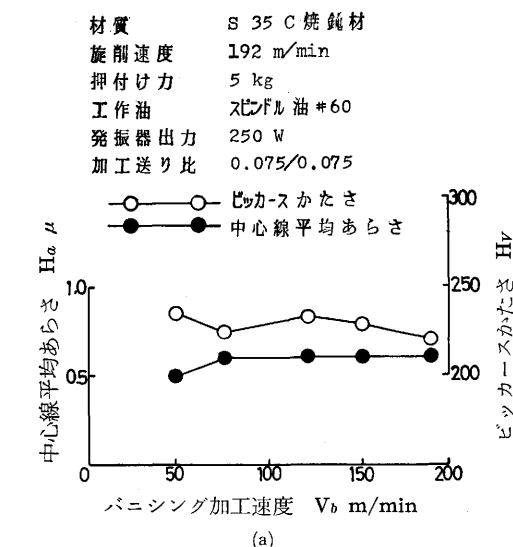


図7 加工速度

ング加工速度とあらさおよびかたさの関係である。図から加工速度の影響はあまりないことがわかる。加工速度が高い場合、あらさの山が工具にぶつかる速度が大きくなりよく加工されるはずであるが、超音波振動衝撃力がかかなり大きく、そのため加工速度の影響はあまりあらわれないのであろう。また加工面に摩擦熱を発生して温度が上がり、それが内部に伝導により熱をうばわれ急冷されると硬化するであろうが、この場合振動接触で摩擦熱の発生が少く、加工速度が高くなってもかたさに対する影響が少いのであろう。一般のパニング加工では加工速度の増加とともにあらさは小さくなり、かたさは大きくなることを前報で述べた。

#### 4・1・4 工具半径および押付け力の影響

工具半径  $r$ 、送り速度  $f_b$  でパニング加工する場合、加工面が完全に塑性変形するものと仮定すると仕上面あらさは  $f_b^2/8r$  となり、工具半径に逆比例する。したがって工具半径は大きいほどよいはずであるが、工具半径が大きくなると接触面積が大きくなり加工圧力が低下し、加工面の凹凸を塑性的に十分ならすことができない。また工具半径が小さすぎると加工圧力が過大になり、摩擦面の油膜が破れぎょう着がおり加工面はあれてくる。したがって工具半径、押付け力、パニング送り速度などはおたがいに関連させて選択しなければならない。図8(a)は工具半径をパラメータにして押付け力とあらさの関係を示している。図から前述の考察が実験とよく一致していることがわかる。(b)は押付け力とあらさおよびかたさの関係である。図から押付け力の増加とともにあらさは小さくなるが、押付け力が8kgを超えてもあまり小さくならないことがわかる。またあらさとかたさの関係は、あらさが小さくなるほどすなわちよく加工されるほどかたさは大きくなっている。また図には示していないが、押付け力が過大になると油膜が切れスティックスリップを発生して金属音を出し、仕上面が著しく悪化することがあった。

#### 4・1・5 発振器出力の影響

図9は発振器出力とあらさの関係である。全般的に出力の増加とともにあらさは小さくなっている。これはあらさの山を押しつぶす効果は押付け力と振動衝撃力の影響を受け、同一押付け力の場合発振器出力を増大して振動衝撃力を大きくするほどよく加工されるためであらう。押付け力が小さい場合には特にこの効果が著しい。しかし押付け力が8kg以上になると出力を増大するほどあらさは大きくなっていく。これはうね

りによるもので、うねりについては後述する。したがって小さな押付け力でも出力をある程度上げればかなり良い仕上面が得られることがわかる。

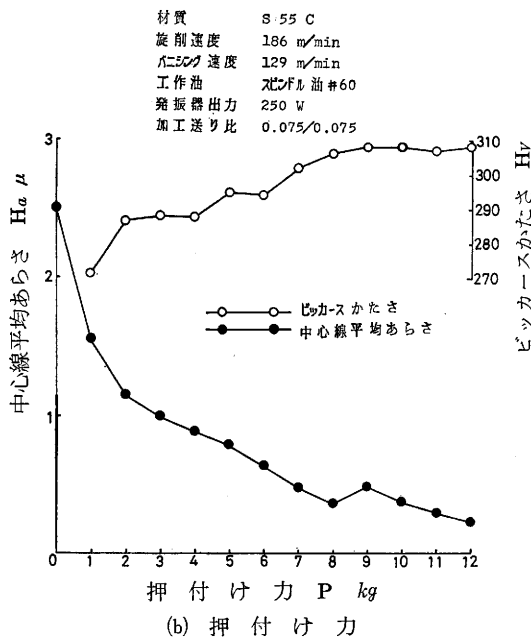
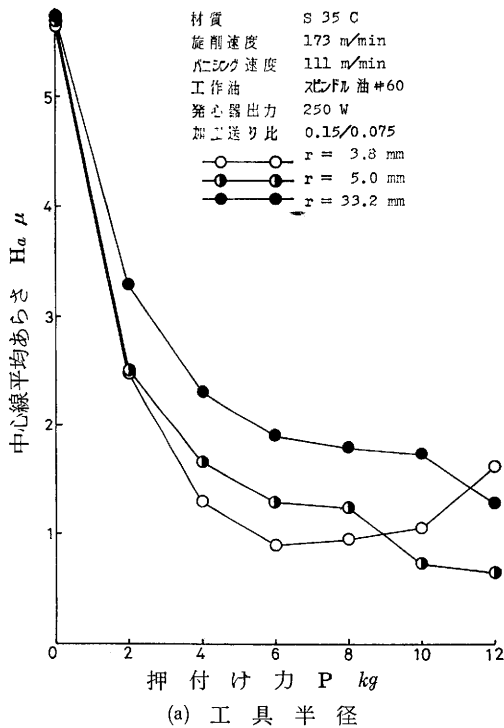
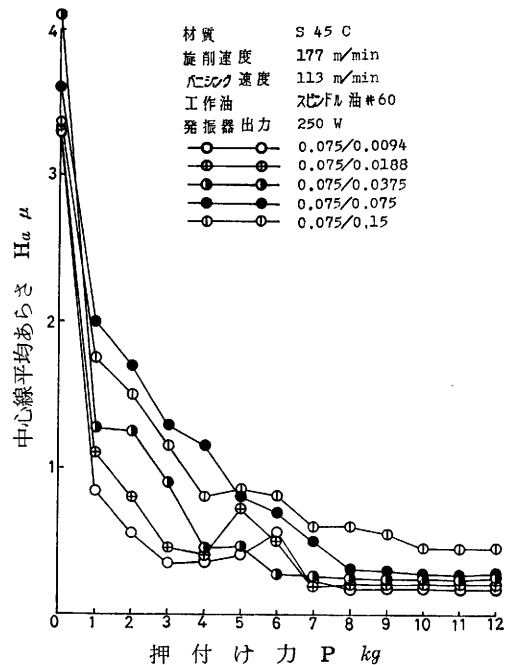
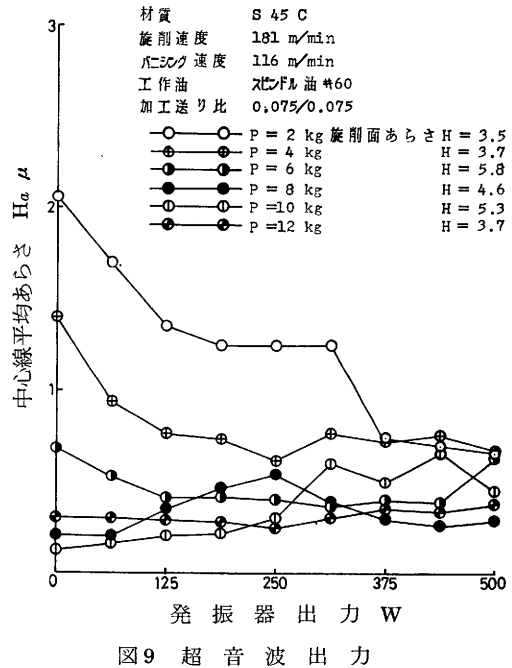


図8 あらさとかたさ

#### 4・1・6 送り速度の影響その他について

発振器出力 250W でパニング送り速度を変えた場合合図10に示すようになった。押付け力が小さい場合、明らかに送り速度が小さいほど仕上面あらさが小さく



なっている。しかし送り速度が大きくても押付け力が大きくて十分あらさの山がならされる場合には送り速度の影響はないといえる。図中の押付け力 5 kg 附近のあらさの上昇はうねりによるものである。

加工条件を適当に選べば良いパニシング加工面が得られるが、2回加工すれば1回で加工する場合よりゆい加工条件でよいことになり、仕上面のあれやうねりの発生を防止できるであろう。図11および表2は二工程パニシングを行なった結果である。図から1回目のパニシング押付け力よりも2回目の押付け力が小さくても確実にあらさは小さくなっている。また同一押付け力で2回パニシング加工した場合は約半分のあら

表2 二工程パニシング

第1 パニシング 押付け力	中心線平均あらさ $H_a$			
	第2パニシング 押付け力 $P_2$			
	0 kg	3 kg	6 kg	9 kg
0 kg	5.6 $\mu$	—	—	—
3 kg	2.3 $\mu$	1.45 $\mu$	0.80 $\mu$	0.50 $\mu$
6 kg	1.4 $\mu$	0.95 $\mu$	0.65 $\mu$	0.50 $\mu$
9 kg	0.9 $\mu$	0.55 $\mu$	0.45 $\mu$	0.35 $\mu$
12 kg	0.6 $\mu$	0.50 $\mu$	0.30 $\mu$	0.20 $\mu$

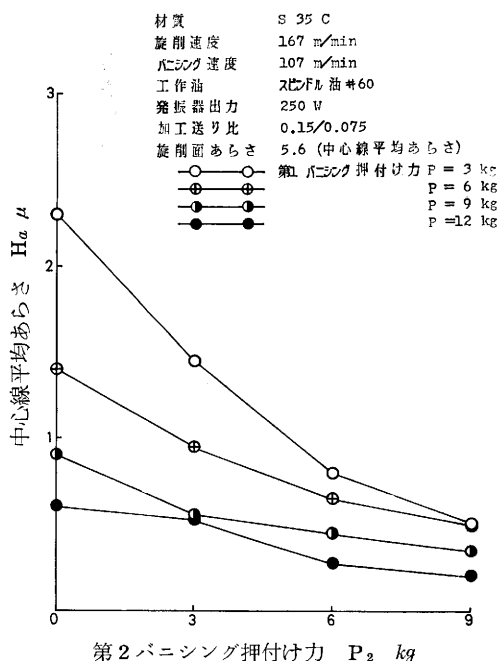


図11 二工程パニシング

さになることがわかる。

#### 4・2 各種材料の被加工性

変形抵抗の大きい硬質材料や加工硬化性の大きい材料は平滑な仕上面にしにくい。また超硬合金工具との親和力が大きくぎょう着しやすい材料も鏡面加工しにくい。ここでは一般によく使用されている材料について、次のような加工条件でパニシング加工を行ない、その特性を明らかにした。

工具半径	$r = 5 \text{ mm}$
加工速度	$V_b = 90 \sim 120 \text{ m/min}$
発振器出力	0 および 250 W
押付け力	0 $\sim$ 20 kg

##### 4・2・1 炭素鋼

図12は S 25 C  $\sim$  S 55 C の4種の炭素鋼について押付け力とあらさの関係を示している。一般に炭素含有量が増加するにしたがって炭素鋼の引張り強さ、降伏点は向上し、塑性変形抵抗は増大する。しかし図からわかるようにその影響はあまりみられない。いずれも押付け力の増加とともにはじめは急に、しだいにゆっくりとあらさは減少し、押付け力が 8 kg 以上ではあまり変化しなくなる。

##### 4・2・2 ステンレス鋼 (SUS 27)

図13はステンレス鋼の押付け力とあらさの関係を示

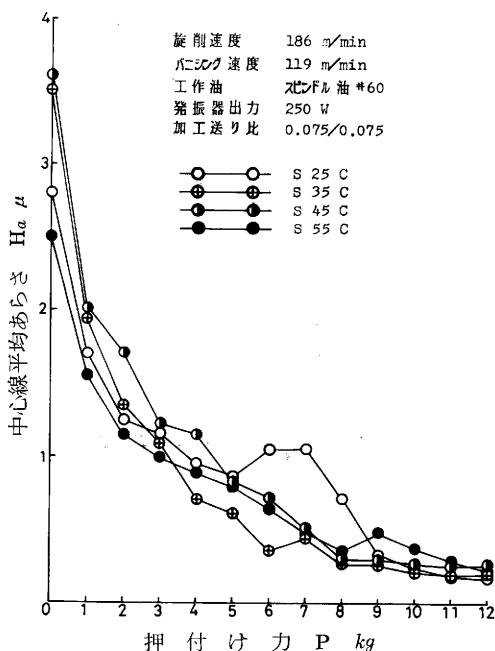


図12 炭素鋼

す。送り比 0.15/0.15, 0.15/0.075 の場合は押付け力の増加とともにあらさは減少しているが, 0.075/0.075 では押付け力 4 kg において最上の仕上面が得られ, それ以上の押付け力ではかえって仕上面は悪化してくる。これはうねりの発生とスティックスリップによるものである。ステンレス鋼のパニングでは, 前報で述べたように工具を超音波振動させないとスティックスリップおよび焼付きを起こしやすく, 工具は著しく摩耗し加工面は非常に荒れる。図14はステンレス鋼を超音波振動をさせないでパニング加工したときの工具摩耗面を示す。ステンレス鋼以外の工作物材質およびステンレス鋼でも超音波振動パニングの場合に

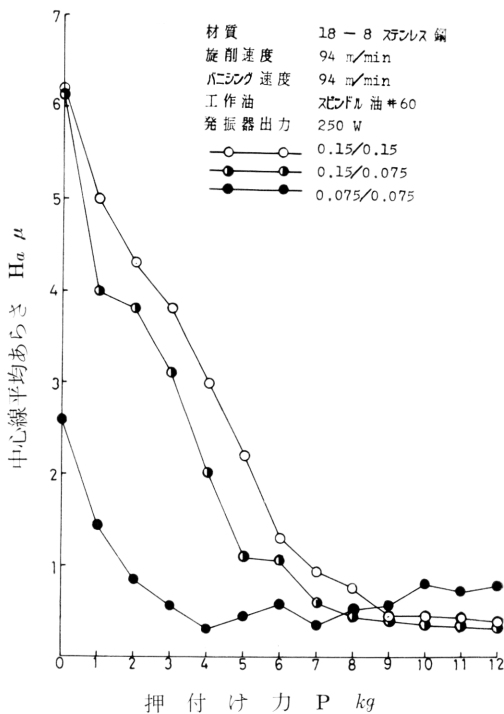


図13 ステンレス鋼



図14 工具摩耗こん

は, 工具の摩耗は実験中ほとんど測定できないほどわずかであった。このことからステンレス鋼に対しては超音波振動をかけないパニング加工は困難で, ステンレス鋼の加工においてとくにはっきりと超音波パニングの特長が表われる。

#### 4・2・3 銅および黄銅

図15は銅についての実験結果であるが, 送り比 0.15/0.075 の場合押付け力が 2 kg を超すとかえってあらさが大きくなっている。このときの仕上面形状を示すと図16のように, 押付け力  $P = 4$  kg および 11 kg の場合うねりの発生がみられる。銅のパニング加工ではうね

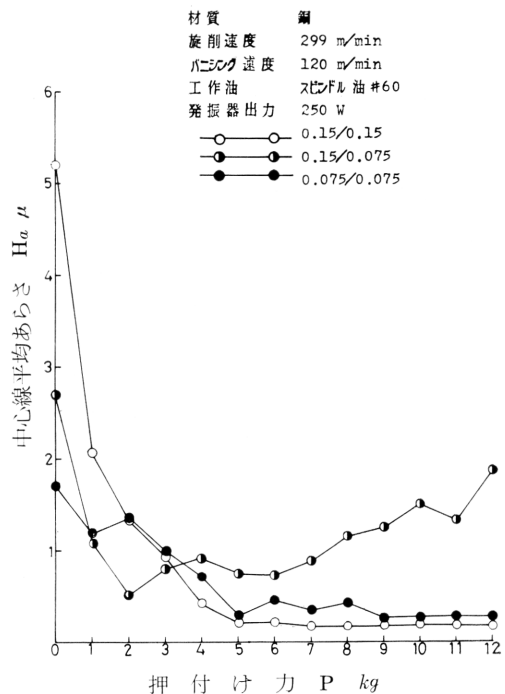


図15 銅

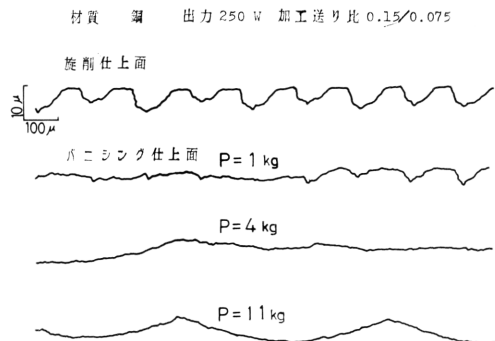


図16



りの発生が比較的多かった。一般に銅はやわらかいため小さい押付け力で十分加工される。したがってうねりの発生をさける注意をすれば、容易により仕上面が得られる。

図17は七三黄銅の場合の関係である。この場合もうねりの発生のためあらさが大きくなることもある。またこの図中には超音波振動を加えなかった場合のバニシングについても示している。超音波バニシング加工に比べてあらさはあまり小さくなっていない。これは黄銅が加工硬化のため可塑性が著しく悪くなるのであらさの山が十分ならされる前に加工がとまるためである。4・2・1で超音波バニシングの特長がとくにステンレス鋼の場合に生かされることを述べたが、黄銅の場合にも超音波バニシングの効果がよくでている。

#### 4・2・4 アルミニウム

図18(a), (b)はアルミニウムについての押付け力とあらさの関係で、図からわかるように超音波振動をかけないときにも十分よい仕上面が得られる。したがってアルミニウムは延展性に富み加工を受けやすいので、とくに超音波バニシングを行なう必要はないといえ

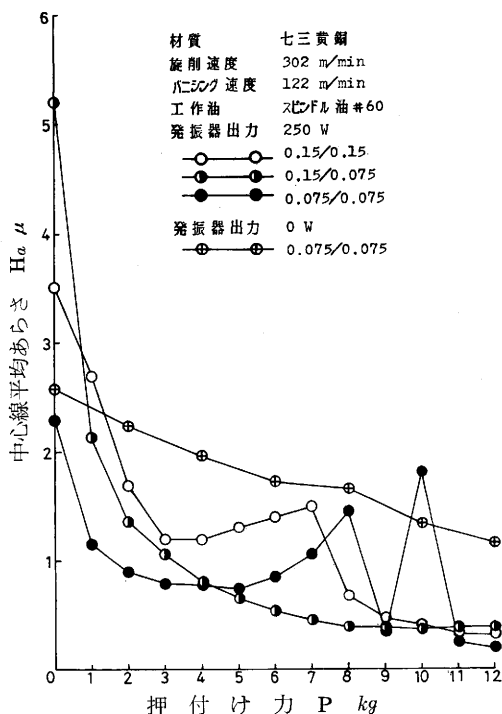
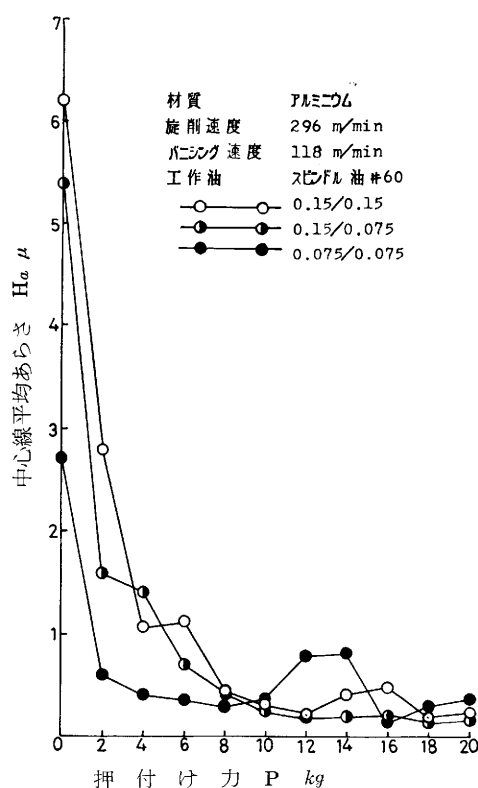
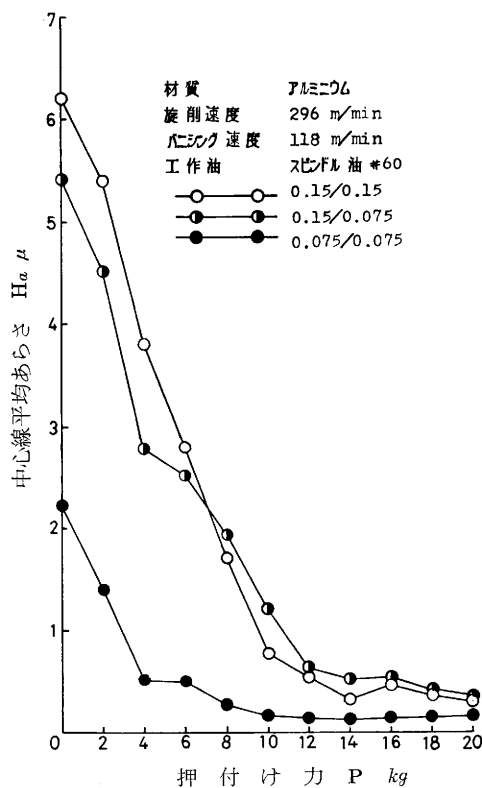


図17 黄銅



(a) 250W



(b) 0W

図18 アルミニウム

る。

#### 4・2・5 鋳 鉄

鋳鉄のように加工硬化性の大きいぜい性材料に対するパニシング加工はひじょうにやりにくいが、一般によく使用される材料であるので実験を行なってみた。図19は鋳鉄についての実験結果である。図からわかるように超音波振動を加えたほうがいくぶん仕上面は良くなっているが、全般的に押付け力をあげても仕上面はあまり良くならない。このことから鋳鉄の鏡面仕上にはパニシングのような塑性加工は適当でないことがわかる。鋳鉄の鏡面仕上には超仕上のような切削加工が望ましい。

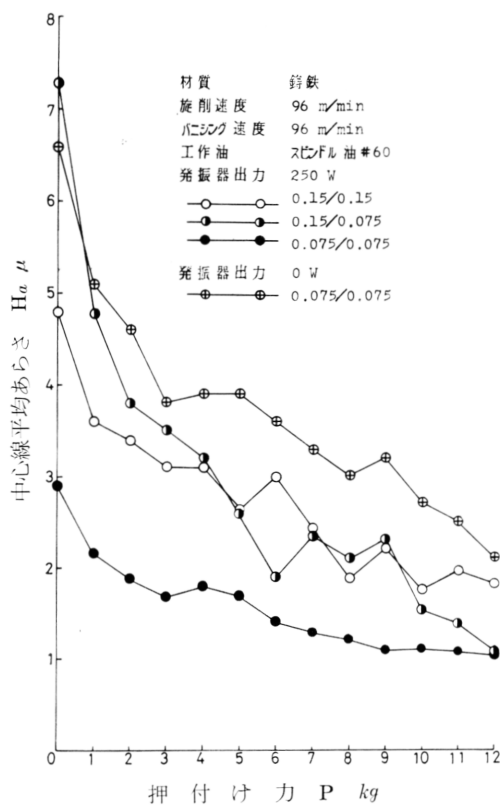


図19 鋳 鉄

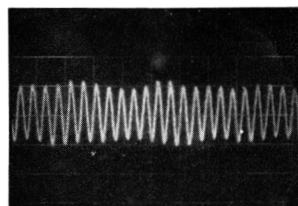
#### 4・3 仕上面形状

##### 4・3・1 うねりに関する考察

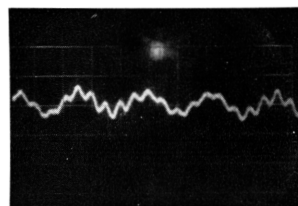
一般にパニシング押付け力の増加とともにはじめ急に後しだいにゆるやかに仕上面あらさはよくなる。このような仕上面のあらさ曲線がときには押付け力増加の途中で大きくなることがあり、その場合仕上面にはパニシング送りよりもはるかに大きいピッチの凹凸

(うねり)がみられる。ここでそのうねりの発生機構について考察してみる。図20(a), (b)は押付け力 8 kg, 発振器出力 250W でパニシング加工した場合のホーンの

横振動を記録したものである。仕上面にうねりが発生している場合ホーンの横振動には(b)のようにはっきりしたうねりがみられた。このうねりが何の振動によるものか調べたところ、ホーン自体の横振動によるものであることが判明した。この振動数は約100Hz(周期約10ms)であ



(a)



(b)

図20 ホーンの横振動

る。また工作物の回転速度は約800rpm (75ms/rev)である。そのため工作物1回転当り7つのうねりがみられ、それらはわずかの周期の差のために1回転ごとに少しづつずれて7重のらせん状のうねりが発生することになる。これは工作物表面の観察からも確認できた。これらの関係を模式的に展開図として示すと図21のようになる。図から仕上面のうねりのピッチはABとなり、工作物回転速度によって変動し、パニシング送り速度に正比例することがわかる。実験でもほぼ同じ傾向が認め

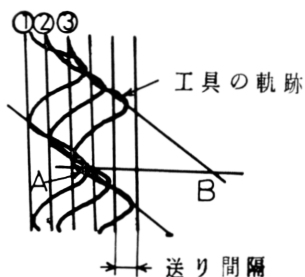


図21 うねりの模式図

られたが、送りが大きくなってもうねりのピッチは正比例的には大きくならない。それは工具がうねり振動をするとき工作物表面の摩擦抵抗のために、うねり振動の振幅がいくぶん抑制されて小さくなるためと思われる。

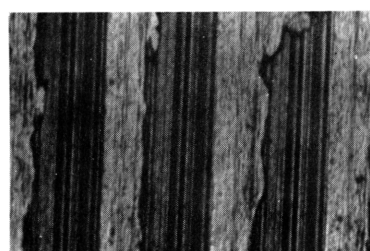
このように仕上面のうねりは工具の横振動によるくいこみのために発生するので、軟らかい材料のパニシング加工で多く発生しやすいはずである。本研究では銅およびアルミニウムの場合押付け力が6~8 kgのときに比較的多発したが、それは系の振動条件が適合す

るためと思われる。工具の横振動をおさえうねりを発生させないためには、工具の横方向の剛性を高める必要がある。しかし超音波パニングを行なうには超音波振動増幅のため細長いホーンの先端に工具を取付けざるを得ない。したがって超音波パニング加工では条件によっては仕上面にうねりが発生するのは避けられず、そのような条件をさけてパニング加工する以外に方法がない。

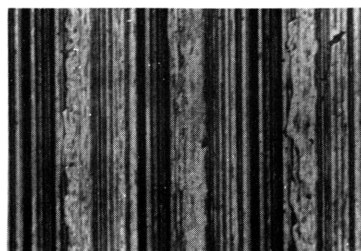
#### 4・3・2 仕上面の顕微鏡観察

図22は超音波パニング加工面の顕微鏡写真であ

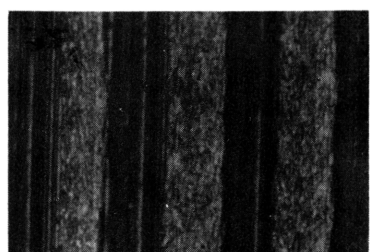
る。いずれも前加工の旋削面が残るように超音波パニング加工を行なったときのもので、あらさの谷部（写真では黒い部分）は加工されておらず旋削すじがそのまま残っている。パニング工具でこすられた部分（白い部分）はあらさの非常に小さいなめらかな仕上面になっている。(c)はステンレス鋼の場合であり、加工条件をきびしくすると(h)のようにぎょう着現象を起し加工面が非常にあれることがある。このような場合には超硬合金の工具もはなはだしく摩耗し、ステンレス鋼のパニング加工の困難さがわかる。(d)は鋳鉄



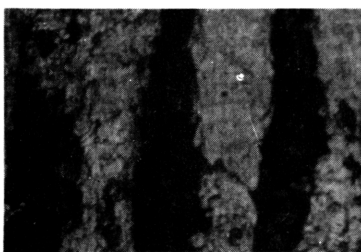
(a) 炭素鋼 S25C



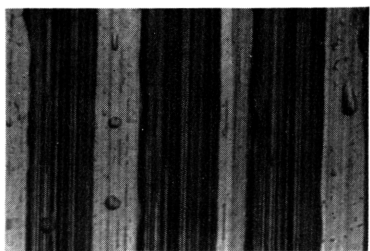
(b) 炭素鋼 S35C



(c) ステンレス鋼



(d) 鋳鉄



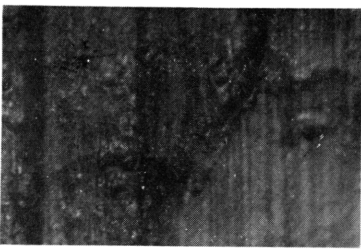
(e) 銅



(f) 七三黄銅



(g) アルミニウム



(h) ステンレス鋼の焼付

図22 顕微鏡写真

の場合であるが、他の材料のようにきれいな加工面が得られていない。これは鑄鉄がぜい性材料で塑性変形をあまり起さず、素材から脱落する部分があるためであらう。

## 5 結 言

パニシング加工法はなめらかな工具を加工面に押付けて摩擦し、塑性変形により鏡面仕上する加工法であるが、その押付け力に超音波振動を重畳する方法をとくに超音波パニシング加工法と名づけた。

超音波パニシング加工では従来のパニシング加工よりもゆるい加工条件で十分な加工が行なわれ鏡面仕上できる。とくにぎょう着性のためパニシング加工が困難とされていたステンレス鋼などの鏡面仕上も容易な

ことなどが明らかになった。しかし銅などの軟質材の超音波パニシング加工では仕上面にうねりを発生することがあり、加工条件を適当に選びうねりの発生をさけねばならない。さらにこのうねりは超音波振動増幅用ホーンの横方向の剛性不足に起因することも明らかにした。

おわりに本研究の実験にご協力いただいた上田明生、森下敏昭両氏に対して深謝の意を表します。

## 参 考 文 献

1. 豊島, 古村, 小林: 福井大工報 17, 1 (1969)
2. E. H. Holl; MACHINERY. Vol. 100 (1962-4)
3. F. P. Bowden and D. Tabor; THE FRICTION AND LUBRICATION OF SOLID 1954.
4. 谷口紀男; 超音波加工法(昭33)日刊工業新聞社  
(昭和44年10月15日受理)